



## Validazione di una macchina di fatica a sviluppo orizzontale

V. Di Cocco, F. Iacoviello, V. Piacente, L. Tomassi

*DiMSAT, Università di Cassino, via G. Di Biasio 43, 03043, Cassino (FR)*

*v.dicocco@unicas.it*

---

**ABSTRACT.** Fatigue crack propagation tests are usually performed by means of hydraulic testing machines characterized by an vertical loading direction aimed to save space. However this disposition is not optimized for experimental activities in aqueous environments. In this work an horizontal oriented fatigue test machine was developed and fatigue crack propagation tests were perform in order to validate the testing apparatus.

**SOMMARIO.** Le prove di propagazione delle cricche di fatica sono solitamente effettuate utilizzando macchine di prova oleodinamiche a sviluppo verticale, al fine di risparmiare spazio nella installazione. Tale sviluppo rende maggiormente difficoltosa l'esecuzione di prove di propagazione in ambienti aggressivi. In questo lavoro viene descritta la progettazione, costruzione e messa a punto di una macchina per prove di fatica a sviluppo orizzontale.

**PAROLE CHIAVE.** Propagazione cricca di fatica; Progettazione macchina di prova.

---

### DESCRIZIONE GENERALE

In questo lavoro vengono descritti lo sviluppo e la costruzione di una macchina di prova di fatica oleodinamica a sviluppo orizzontale, successivamente brevettata [1]. La necessità di procedere a tale attività è scaturita dalla scarsa disponibilità in commercio di macchine siffatte costruite in serie e dagli elevati costi relativi alla costruzione di prodotti di tipo “custom” su specifica cliente. L'obiettivo della progettazione è stato quello di elaborare un prodotto razionale ed innovativo, ma con largo uso di componentistica commerciale, di modesto impatto ambientale e di costo ridotto. La macchina in oggetto è destinata ad effettuare prove di propagazione di cricche di fatica con frequenza fino a 150 Hz, utilizzando preferenzialmente, ma non unicamente, provini standard ASTM tipo CT, con la possibilità di effettuare prove sia in aria che in ambiente aggressivo senza rischiare il danneggiamento di eventuali estensometri meccanici utilizzati per misurare l'avanzamento della cricca. A tal fine è stata predisposta una vasca in nylon dove è possibile contenere la soluzione aggressiva ed immergervi il provino. La prova permette, tra le altre cose, di caricare di idrogeno il campione e consente di analizzare l'effetto dell'infragilimento da idrogeno sull'avanzamento della cricca di fatica. Il carico applicato viene misurato utilizzando una cella di carico al cui centro filettato è avvitato il perno “porta sospensione” dell'afferraggio fisso. L'avanzamento della cricca è misurato tramite trasduttore elettronico costituito da una coppia di lamelle da inserire nella lamatura trasversale del campione. Il software di gestione permette di eseguire tutte le prove a norma ASTM, ma non ha vincoli particolari per l'esecuzione di prove specifiche fuori standard (Fig. 1) [2-5]. Dal punto di vista funzionale i bracci di sospensione, così come la vaschetta, sono agevolmente smontabili e permettono il cambio formato in tempi molto rapidi. La vaschetta presenta un rubinetto di scarico rapido. Sotto il piano macchina è alloggiato un altro piano rivestito in polizene.

Gli inconvenienti delle prove di fatica ad alto numero di cicli consistono nel fatto che le attrezzature disponibili in commercio sono molto ingombranti e sono caratterizzate da potenze molto elevate. La maggior parte sono

---



esclusivamente verticali. Risulta, quindi, molto complicato riuscire a svolgere delle prove in ambiente aggressivo, ancor più problematico eseguirle in ambienti acquosi [6-9].

Con lo sviluppo orizzontale della macchina risultano evidenti i seguenti vantaggi:

- ✓ la macchina consente di eseguire molto agevolmente prove di fatica in ambiente aggressivo ed elevata frequenza;
- ✓ si ha un basso impatto ambientale in quanto i circuiti di raffreddamento sono a ciclo chiuso;
- ✓ necessita di bassa potenza elettrica;
- ✓ garantisce elevate prestazioni con modesti ingombri;
- ✓ è agevole per il trasporto, necessitando solo di alimentazione elettrica e avendo tutti gli impianti a bordo macchina.



Figura 1: Macchina di fatica a sviluppo orizzontale.

## ELEMENTI COSTRUTTIVI

Le parti principali della macchina sono evidenziate nei disegni allegati (Fig. 2). In particolare il basamento è costituito da un'opera di carpenteria d'acciaio in scatolato 80x80x3 saldato con piastre superiori forate e verniciato. Sulle piastre forate viene imbullonato il telaio superiore, anch'esso con struttura portante in scatolato 80x80x3. Il telaio superiore riceve l'alloggiamento del piatto porta meccanismi, parte principale della macchina. Il piatto è realizzato in un unico pezzo lavorato alle macchine utensili, con i riferimenti spinati per tutti i componenti costituenti la meccanica quali:

- ✓ staffe bloccaggio cilindro oleodinamico;
- ✓ staffe di posizionamento della vaschetta in nylon;
- ✓ staffe porta pinze di sospensione CT;
- ✓ staffa fissaggio perno cella di carico.

La parte superiore della macchina (gabbio) è realizzata in profili di alluminio estruso 45x45 con pareti in policarbonato trasparente; sono ricavati due accessi a due ante con interblocco elettrico. Nella parte superiore del gabbio è predisposta la flangia di attacco dell'impianto di aspirazione per le prove in ambiente aggressivo.



La parte di potenza è rappresentata da una centralina che vede integrata la presenza del motore trifase da 2.2kW che muove una pompa ad ingranaggi. Sono altresì integrati il serbatoio contenente l'olio (50 l), sulla cui sommità sono montate le elettrovalvole di comando del circuito idraulico quali un pressostato in grado di selezionare due diverse pressioni massime di mandata, ed una valvola VAS ad alta dinamica (banda passante di 150 Hz) in grado di pilotare l'attuazione della macchina.

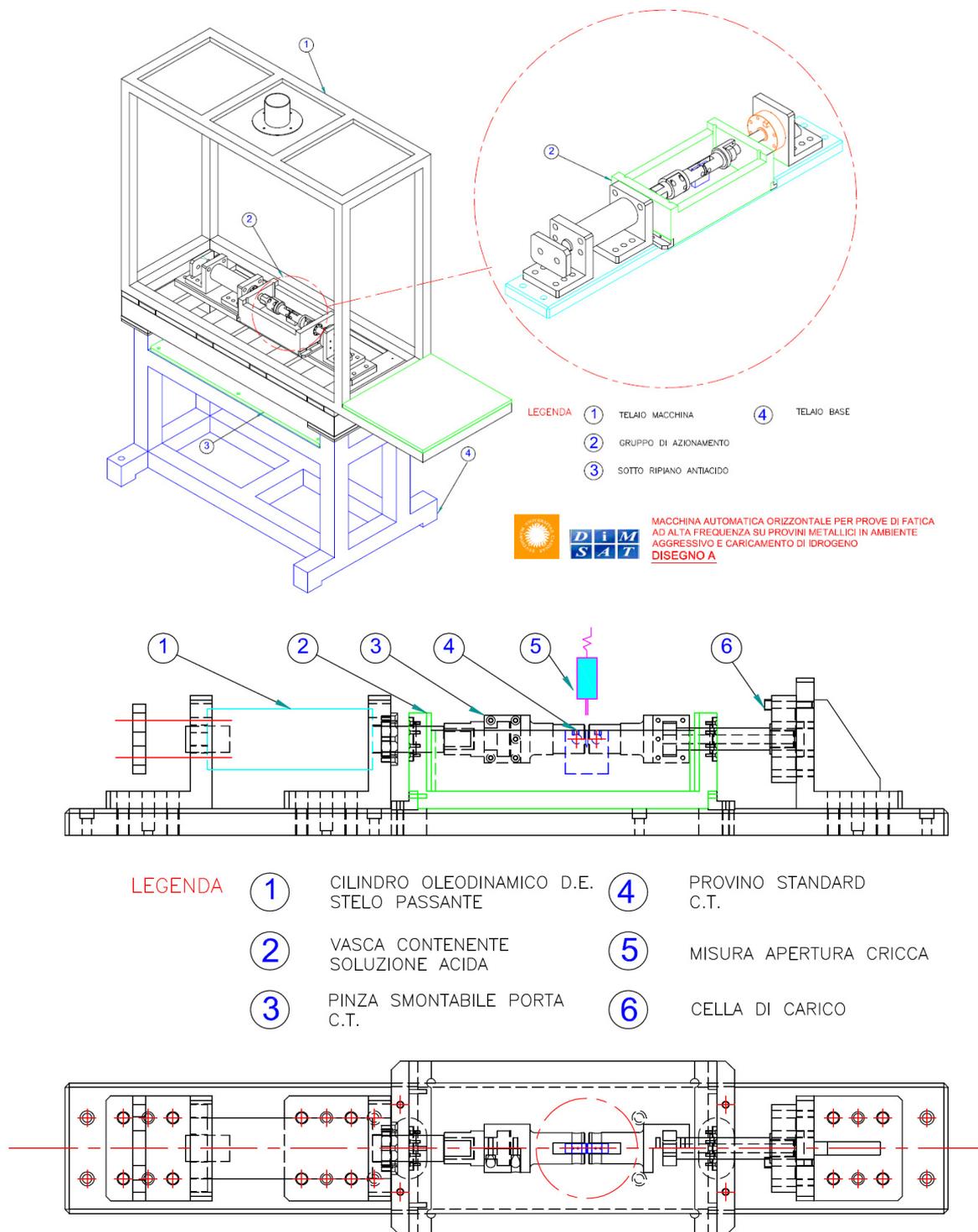


Figura 2: Assieme con particolare della parte di alloggiamento provino ed assieme della parte portante dell'attuazione.



## IL SISTEMA DI CONTROLLO

La parte di potenza della macchina di fatica a sviluppo orizzontale è controllata da un sistema ad elaborazione digitale che si occupa anche della elaborazione dei segnali che provengono dalla strumentazione di bordo (Fig. 3). I segnali provenienti dai sensori sono indirizzati verso condizionatori di segnale che eseguono una adeguata amplificazione prima della quantificazione, effettuata da apposite schede di conversione A/D. Solo nel caso di segnali troppo deboli, quali ad esempio quelli provenienti dalla cella di carico, si è proceduto all'amplificazione immediatamente dopo il sensore al fine di ridurre l'effetto dei disturbi elettromagnetici provenienti essenzialmente dalla ventola di raffreddamento dell'olio. In questo caso la scelta di montare un trasduttore integrato nella cella di carico, aumenta i costi, ma consente anche di effettuare un condizionamento diverso in grado di controllare l'eventuale guasto della cella. Infatti è stata scelta una cella con trasduttore di segnale che genera un'uscita a 2,500V nel caso di cella scarica, con segnale che, in caso di massimo carico, può valere 4,500 o 0,500 V, rispettivamente in caso di trazione o di compressione. In caso di segnale nullo si avrà certamente una condizione di guasto.

Il sistema di comando è caratterizzato da due tipologie di segnale, una di tipo on/off a 24V continui, assicurata da una scheda a relais, ed una di tipo analogico  $\pm 10V$ , assicurata da una scheda in grado di generare funzioni periodiche di qualunque forma, caratterizzate da periodo, ampiezza e media impostabili via software. La scheda a relais è altresì fornita di otto ingressi di tipo on/off che sovrintendono al controllo di tutti i segnali provenienti dalle sicurezze, dall'avaria del motore della centralina al corretto funzionamento del filtro del circuito idraulico, dal segnale di minimo livello al segnale di massima temperatura dell'olio. In questo modo, in caso di guasto, oltre ad avere un arresto del sistema è possibile avere direttamente sull'apposito pannello del software la sua posizione in modo da potervi intervenire direttamente.

Tutti i segnali, dalla sensoristica ai comandi delle elettrovalvole, fino ai consensi di sicurezza, sono gestiti da un unico software che si occupa anche della elaborazione delle informazioni sia ai fini di controllo della macchina, sia ai fini di registrazione dei risultati della prova.

Per quanto riguarda il controllo, il software effettua periodicamente e con cadenza impostabile da apposito pannello di settaggio, una serie di misure istantanee del carico e dell'apertura del provino CT, con dinamica in grado di effettuare anche 1000 misurazioni per singolo ciclo a 150Hz, valori che salgono a 15000000 alla frequenza di 0,01Hz. Tali valori possono essere utilizzati per effettuare due diverse tipologie di filtraggio software:

- ✓ la misurazione di vari cicli ed il calcolo di un unico ciclo quale media dei cicli misurati;
- ✓ la misurazione di un elevato numero di punti per un singolo ciclo e la loro riduzione mediante calcolo della media su un numero finito di sottogruppi contigui.

Queste tecniche di filtraggio, comunemente adottate nei sistemi di misurazione dei segnali periodici, riducono ulteriormente l'effetto dei disturbi elettromagnetici randomici, fornendo una misura più precisa delle grandezze reali. Le due tipologie di filtro sono state implementate e parametrizzate in modo da poter essere utilizzate nelle condizioni ottimali. Ad esempio per le prove a bassa frequenza (0,01Hz è il limite minimo impostabile) il filtraggio ottenuto misurando numerosi punti per un singolo ciclo da raggruppare in un numero minore di punti nei quali calcolare le medie, consente di avere un abbattimento significativo degli spike e nel contempo di avere la misura della curva con cadenza che coincide con il periodo impostato. Per le prove effettuate ad alta frequenza si possono misurare di diversi cicli che possono essere utilizzate per l'estrapolazione di un ciclo unico quale media dei cicli misurati. Nei casi intermedi è possibile utilizzare entrambi i filtri i cui parametri (punti a ciclo da raggruppare e numero di cicli da utilizzare nelle medie) sono anch'essi impostabili nel pannello dei settaggi.

Le misure effettuate e filtrate vengono utilizzate dal software per poter controllare la parte di potenza secondo un sistema a retroazione di tipo intelligente. In particolare il controllore ad anello chiuso utilizzato, confronta i valori provenienti dai sensori e li confronta con quelli nominali della prova calcolandone l'errore. Se tale errore risulta superiore alla tolleranza, il sistema corregge i segnali di comando secondo valori di step preimpostati che possono essere di due tipi:

- ✓ ad alto valore di correzione, nel caso in cui l'errore rilevato fosse maggiore della tolleranza e di un valore soglia;
- ✓ a basso valore di correzione, nel caso l'errore fosse maggiore della tolleranza, ma comunque minore della soglia.

Nel caso di forma d'onda sinusoidale, o di altre forme d'onda quali ad esempio la quadra o la triangolare, i valori che possono essere corretti sono l'ampiezza massima e la media. Ad ogni correzione segue una fase transitoria nella quale il sistema deve raggiungere il regime. Tale fase viene comunque monitorata, ma il controllo dell'errore viene effettuato soltanto raggiunto il regime. La dinamica della macchina è tale che il regime viene raggiunto nel tempo necessario per effettuare tre cicli, pertanto il sistema comincerà a calcolare l'errore ed a confrontarlo con le tolleranze a partire dal quarto ciclo di applicazione del carico.

Tutti i valori misurati ed utilizzati per il calcolo delle grandezze di interesse, quali ad esempio la lunghezza della cricca “a” ed il valore di  $\Delta K$ , sono calcolati soltanto nel caso in cui la macchina si trovi in condizioni di regime. Le procedure utilizzate per il calcolo di “a” e di  $\Delta K$  sono quelle riportate nella ASTM E 647. I valori sono registrati di volta in volta o solo se la cricca avanza di una quantità superiore ad un valore impostabile come parametro.

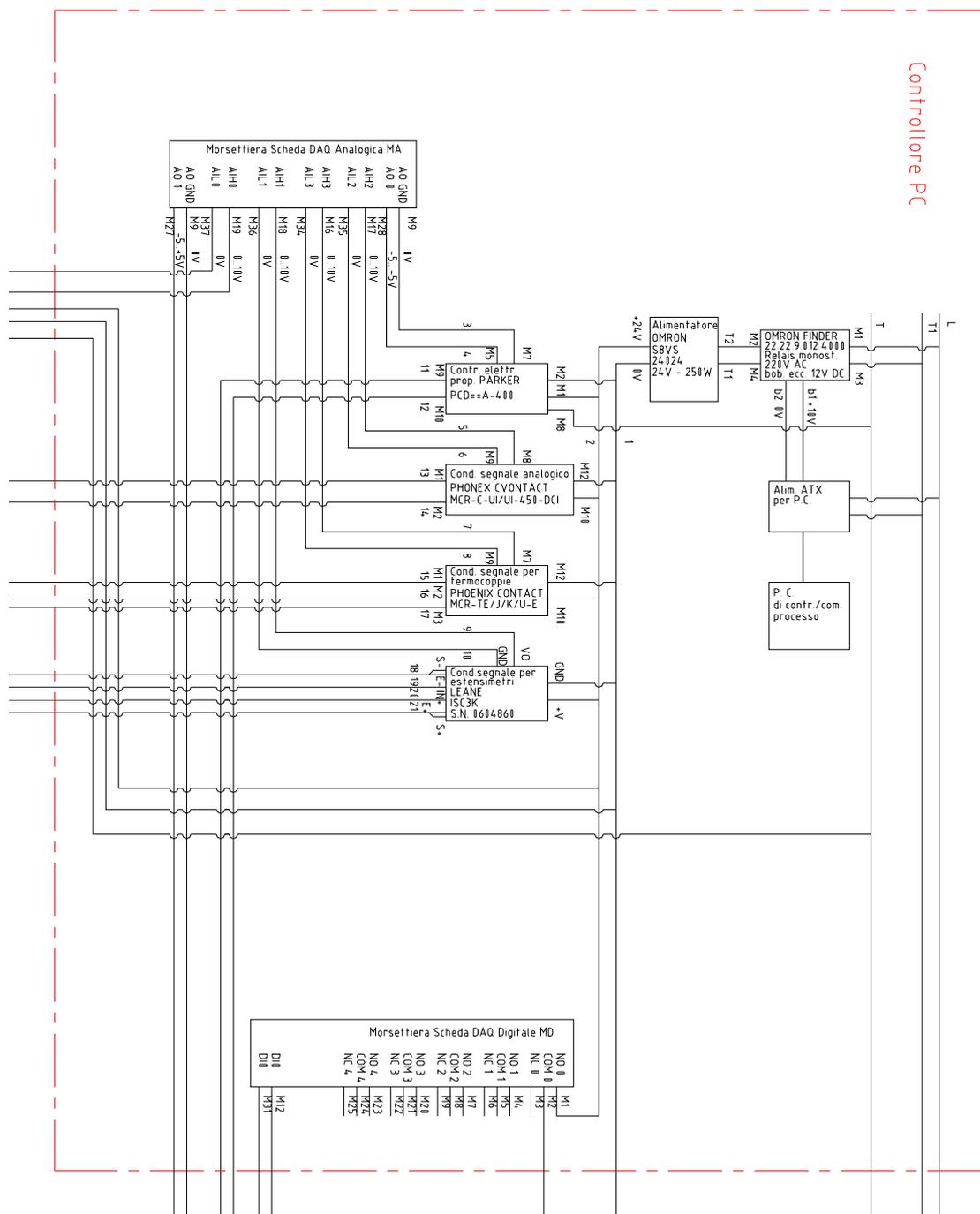


Figura 3: Schema di collegamento del sistema di controllo.

In questa fase non viene utilizzata alcuna interpolazione dei dati, mentre è possibile una interpolazione mediante parabola per sette punti (ASTM E 647), o per un numero di punti qualsiasi, solo successivamente utilizzando i risultati memorizzati.



## VALIDAZIONE MACCHINA DI PROVA: MATERIALE E PROVE

**A**l fine di validare il comportamento della macchina a sviluppo orizzontale descritta nel paragrafo precedente, sono state effettuate alcune prove di propagazione di cricche di fatica utilizzando un acciaio inossidabile ottenuto dalla sinterizzazione di polveri di acciaio inossidabile austenitico con polveri di acciaio inossidabile ferritico nel rapporto 60/40. La composizione chimica, la densità e la microstruttura finali sono riportate nella Tab. 1 e nella Fig. 4. I risultati delle prove di propagazione sono stati confrontati con quelli precedentemente ottenuti utilizzando una macchina per prove oleodinamica Instron 8501 [10].

	Austenite	Ferrite	Martensite
60% AISI 316LHC + 40% AISI 434LHC ( $\rho = 7.14 \text{ g/cm}^3$ )	31.0	7.5	61.5

Tabella 1: Composizione chimica delle polveri utilizzate per la sinterizzazione dell'acciaio.

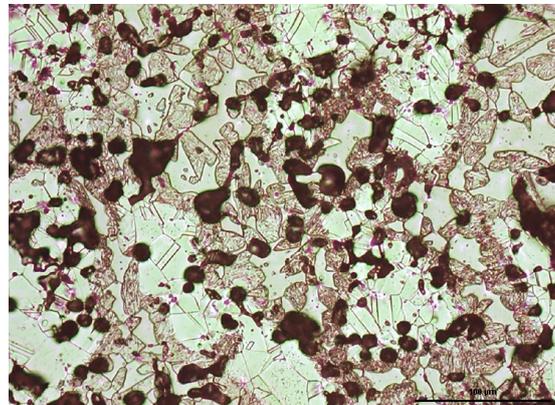


Figura 4: Microstruttura dell'acciaio utilizzato per la costruzione dei provini CT: martensite, ferrite, austenite e micropori.

Le prove di fatica sono state effettuate in aria alla frequenza di 30 Hz, con carico applicato con forma d'onda sinusoidale in condizioni di ampiezza costante ( $\Delta P=3000\text{N}$ ) e con rapporto di carico  $R=0,5$ . Sono stati utilizzati provini di tipo CT (Compact Type) dello spessore di 10 mm, secondo la norma ASTM E 647 [11].

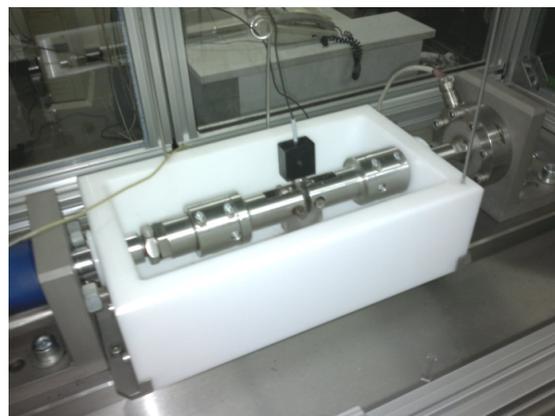


Figura 5: Alloggiamento del provini di fatica.

I provini sono stati montati nell'alloggiamento della macchina come riportato in Fig. 5 e le prove sono state effettuate in aria. E' stato effettuato un precriccaggio preliminare per una lunghezza pari a circa 2 mm a partire dall'apice dell'intaglio.



## RISULTATI

L'evoluzione della lunghezza della cricca e dei corrispondenti valori di  $\Delta K$  ottenuti con il procedere della prova di propagazione della cricca di fatica (numero di cicli) è riportata nella Fig. 6. Entrambi i parametri sono caratterizzati da un andamento crescente ed il valore massimo di lunghezza della cricca ottenuto è stato di circa 21.8 mm in corrispondenza di 1208478 cicli. Tale valore è stato verificato manualmente dopo la rottura del provino mediante misurazione con calibro ventesimale. La rottura di schianto, macroscopicamente visibile, è avvenuta in corrispondenza di un valore di  $\Delta K$  pari a circa 22  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  (Fig.6 b).

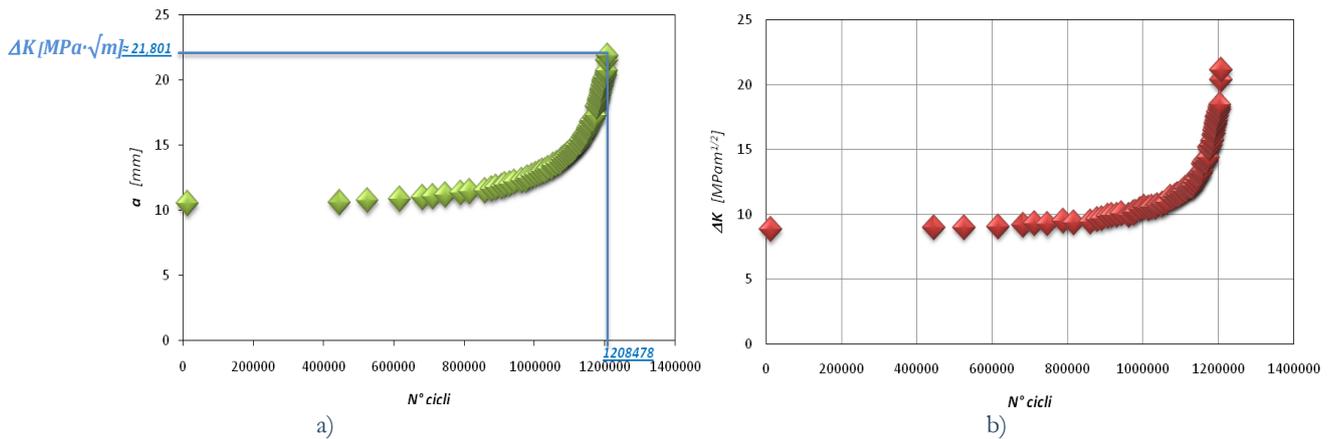


Figura 6: Misura di cricca e sollecitazione in funzione del numero di cicli: a) lunghezza della cricca “a”, b) valori del  $\Delta K$ .

In corrispondenza di ciascuno dei valori della lunghezza della cricca e, quindi, del  $\Delta K$ , è stato possibile determinare il corrispondente valore della velocità di avanzamento della cricca di fatica. I risultati delle tre prove effettuate con la macchina a sviluppo orizzontale sono risultati essere caratterizzati da una notevole ripetibilità. Nella Fig. 7 il risultato di una delle tre prove viene confrontato con i valori  $da/dN-\Delta K$  ottenuti utilizzando la macchina per prove meccaniche oleodinamica Instron 8501. E' possibile osservare come l'andamento dei risultati sperimentali ottenuti con le due attrezzature di prova sia sostanzialmente identico,

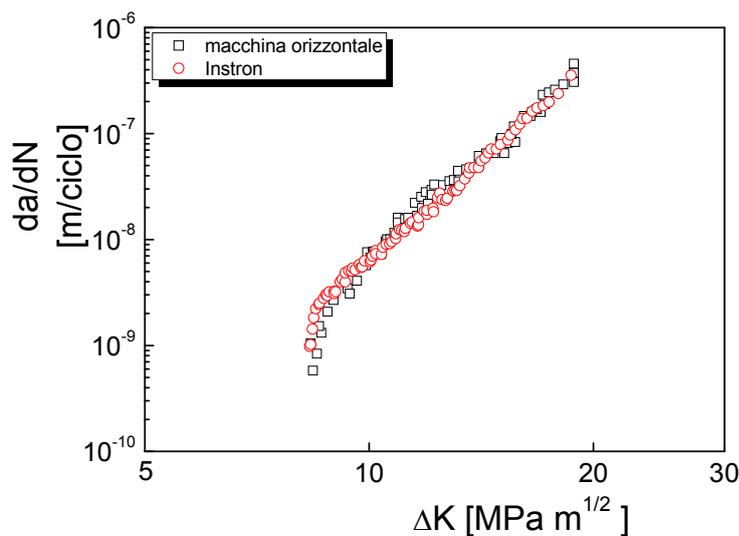


Figura 7: Confronto dei risultati delle prove di propagazione della cricca di fatica nell'acciaio inossidabile sinterizzato 60/40 ottenuti con la macchina di prova a sviluppo orizzontale e con la macchina Instron 8501.



## CONCLUSIONI

In questo lavoro viene descritta la progettazione ed implementazione di una macchina per prove di propagazione di cricche di fatica a sviluppo orizzontale. Sono state effettuate alcune prove di propagazione di cricca di fatica considerando un acciaio inossidabile sinterizzato ottenuto da polveri austenitiche e ferritiche nel rapporto 60/40 il cui comportamento è stato precedentemente analizzato utilizzando una macchina per prove meccanica oleodinamica commerciale Instron 8501.

I risultati ottenuti sono risultati estremamente incoraggianti:

- i valori di  $da/dN-\Delta K$  sono risultati essere notevolmente ripetitivi
- i risultati ottenuti sono assolutamente confrontabili con quelli ottenuti in precedenza con una macchina commerciale.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Iacoviello, V. Di Cocco, V. Piacente, Macchina orizzontale automatica per prove di fatica ad elevata frequenza su provini metallici in ambiente aggressivo e caricamento di idrogeno, brevetto depositato il 15 febbraio 2010, FR2010A000003.
- [2] M. Nystrom, B. Karlsson, *Materials Science & Engineering*, A215 (1996) 26.
- [3] R.P. Baron, F.E. Earner, J.A. Wert, *Scripta Materialia*, 39 (1998) 269.
- [4] P. Datta, G.S., Upadhyaya, *Materials Chemistry and Physics*, 67 (2001) 234.
- [5] T. Marcu Puscas, A. Molinari, *La Metallurgia Italiana*, 6 (2003) 21.
- [6] N. Lopez, M. Cid, M. Puiggali, *Corrosion Science*, 41 (1999) 1615.
- [7] F. el Hilali, M. Habashi, A. Mohsine, *Ann. Chim. Sci. Mat.*, 24 (1999) 169.
- [8] R. O. Ritchie, *International Journal of Fracture*, 100 (1999) 55.
- [9] I.S. Pinyak, *Strength of Materials*, 3 (2001) 481.
- [10] F. Iacoviello, V. Di Cocco, *Corrosion Science*, 49 (2007), pp. 2099-2117, 2006.
- [11] ASTM Standard test Method for Measurements of fatigue crack growth rates (E647-93), Annual Book of ASTM Standards (1993), 0301, American Society for Testing and Materials